F1 空力開発手法の紹介

Development Methodologies for Formula One Aerodynamics

小　川　　厚*　　矢　野　修二郎*　　真　塩　　享*
Atsushi OGAWA　　Shujiro YANO　　Susumu MASHIO
滝　口　　貴*　　中　村　信　介*　　新　谷　　満*
Takashi TAKIGUCHI　　Shinsuke NAKAMURA　　Mitsuru SHINGAI

要　旨

F1空力開発の大部分はダウンフォースまたは揚抗比を目的関数とした最適化であり，風洞と CFD を用い開発と効果実証をおこなうことである．本稿では，その最適化を進めるための開発手法として，風洞，CFDなどの空力開発ツールと，それらを用いた従来の開発指標を紹介する．また，新たに確立したタイヤ変形の空力荷重への影響解析や減速時の空力過渡特性解析などの開発指標とともに，そこで得られた流れに関する知見も紹介する．

ABSTRACT

The greater part of aerodynamics-related development for Formula One involves optimization using objective functions of downforce and the lift-drag ratio (L/D), and verification of effects using wind tunnels and CFD in the development process. As examples of development methodologies used to advance this optimization process, this paper will discuss aerodynamics development tools, including wind tunnels and CFD, and the conventional development indices that employed these tools. In addition, the paper will introduce new indices for analysis of the effect of tire deformation on the aerodynamic load and analysis of transient aerodynamic characteristics during deceleration, and will also consider the findings made regarding air flows using these indices.

１．まえがき

ダウンフォースによって，コーナリング時のタイヤに発生する横力限界と，減速時の制動力限界を上げることができる．空気抵抗は車両の加速性能を決める重要な要素である．その他，前後のダウンフォースバランスも車両安定性に寄与することから，この３要素のトレードオフを考慮しながら，ダウンフォースまたは揚抗比のいずれかを最大化することが，空力開発における目的となる．

開発は主に50%モデルを用いた風洞試験により車体形状が最適化され，実車風洞試験によりその効果が実証される．同時に CFD や PIV（Particle Image Velocimetry）を用い現象解析をおこなうことで，モデル風洞での開発を効率よく進めている．さらに近年は，CFDでも空気力をある程度定量的に評価できるようになり，最適化の一端を担うようになりつつある．また，風洞と実走の橋渡しをするという意味でも CFD の重要性は増している．例えば，タイヤ横力によるタイヤ変形時の流れにおいて，実機風洞試験では模擬できない実走状態をCFDで再現することで，実際のサーキット走行時の車両周り流れについて新しい知見を得た．また，その一部に関して風洞試験による効果実証をおこなうことができた．

さらに近年は，車両振動時や減速時の非定常空力特性にも目が向けられ始めている．特に，F1ではブレーキング時に最大で５Ｇもの加速度が掛かるため，そのときの空力過渡特性がしばしば課題となってきた．これについても，水槽によるスローモーション試験をおこなうことで，過渡空力現象の影響について一部明らかにした．

＊四輪R&Dセンター

2．空力開発ツール

本章では，空力開発ツールとしてムービングベルト式の風洞設備と CFD を紹介する．

2.1. 風洞設備

2.1.1. 風洞の構造

F1空力開発では，主に回流型の低速風洞が用いられている．テストセクションは，オープン，クローズの両タイプが用いられる．クローズセクションの場合は，風洞によりアダプティブ壁を用いブロッケージの低減が図られている．

風洞地面に境界層があると，車体下面負圧の逆圧力勾配により，地面の境界層が車体下面より先に剥離してしまうことがあるため，次のような対策がなされている(Fig. 1)．

まず，テストセクションの入り口で，ナイフエッジ構造とパンチングメタル等の構造による吸い込みにより，地面境界層を除去する．さらにこの直後にムービングベルトを配置し境界層の発達を抑える．その結果，少なくとも境界層ピトーレイクの測定限界高さ(3 mm程度)以上は，地面境界層は存在せず，一様流を保っていることを確認した．

また，ベルトは車体下面の負圧によって持ち上げられないよう，樹脂製の場合はベルト下からの吸引力により，ステンレス製の場合はベルト前後の駆動軸間の張力により制御されている．

風路の温度は，空力荷重がかかったときのモデル各部の微小な変形度合いや，温度変化による部材の伸び縮みの影響，計測機器の温度ドリフトなどを最小にするため，常に一定に管理されている．通常の50%モデルテストでは，気温25 ℃とし，最適化をおこなうときの風速は約 45 m/s を基準とした．

2.1.2. 風洞モデルの構造と計測器

まず50%モデルの基本構造について説明する(Fig. 2)．モデルは天井から支柱で支えられる．この支柱の下部に，モデルの姿勢を変えるためのピボットやアクチュエータ，モデルにかかった空気力を測定する６分力ロードセルが配置される．

モデルはスパイン(骨格)に交換可能な外皮をかぶせた構成になっており，スパインの前後部分にレーザ車高計を搭載し，ピッチ角と車高の制御をおこなう．また，フロントウィング(以下，FW)とリヤウィング(以下，RW)の構造の根元には３分力のロードセルがあり，それぞれダウンフォース，ドラッグ，ピッチングモーメントの計測ができる．

モデルにはヨー，ロール，ステアの制御機構が加えられ，複雑なモデル姿勢を再現する．また，ムービングベルトを含む風洞の地面板全体のヨー回転も可能である．モデルにはこのほかに，ラジエータの通過風速計(プロペラ風速計または差圧計)や各部の静圧測定用の圧力測定スキャナ，各ホイールのドラッグが測定できる１軸のロードセルが搭載されている．

次に，車輪支持方法について説明する．車輪の支持方法はホイールオフ，オンの二通りがある．ホイールオフ構造では，ホイールは外側からホイールサポートアームで支持される．モデルと接触しないので，車高変化によってモデルに反力が出ることが無いものの，ホイールの微小なキャンバ変化，ホイール内面と車体側部品の距離などが若干不正確となる．ホイールオン構造は実際と同じジオメトリのサスペンションとなる．プッシュロッドの動きだけを拘束しないようにすることで，より正確なホイールの動きを再現できるが，サスペンションのバンプやリバウンドによる若干のフリクションやばね力の反力がモデルに伝わるため，計測のゼロ点補正(テア)測定に注意が必要である．

タイヤは，コンタクトパッチ付近のつぶれ形状の断面を一周させた台形断面の剛体タイヤ(材質はアルミや CFRP)が使われていたが，近年はタイヤサプライヤの供給による50%スケールの風洞モデル用タイヤの使用が一般的となっている．

また，テア測定は，通常低速でベルトを回し，風速はゼロでおこなう．このとき，モデルの姿勢は，計測する全姿勢を再現し，それぞれの計測点でテアを取ることで，より精度の高い測定ができる．しかし，計測時間の点では不利となるため，テアを１姿勢で代表させるか，それに最高，最低車高の値の線形近似をかけることで，測定時間を短縮することが多い．

2.1.3. 可視化技術

PIV 測定は和光基礎技術研究センターの技術協力によりおこなった．その三次元 PIV 計測の構成について述べる．

シーダ発生装置は熱交換器の後ろ，整流格子の間のスペースに置かれた．シーダはグリコール系，粒径は１マイク

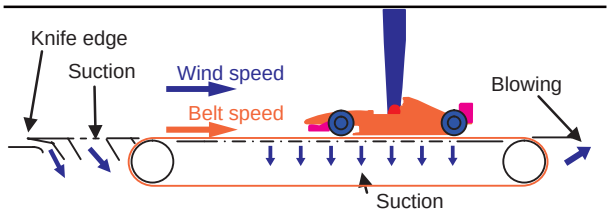


Fig. 1　Moving belt configuration

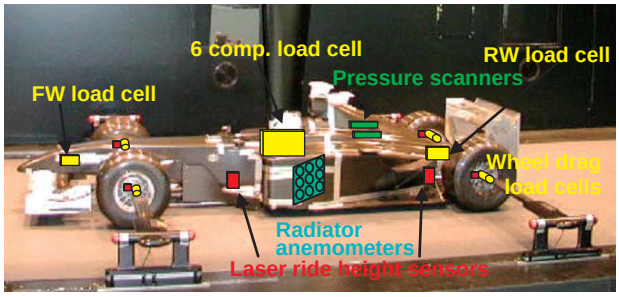


Fig. 2　50% model measurement system

ロメートル程度である．レーザは風路外側の光学系により，モデル周辺に照射されるが，光学系の経路，カメラ位置を変えることで，x方向，y方向z方向，それぞれ測定することが可能である(Fig. 3)．ただし，タイヤの内側のx断面など，物理的にレーザが届かない範囲の測定には限界がある．

2.2. CFD(Computational Fluid Dynamics)

近年のF1開発において，CFDは風洞設備とならび重要度が高くなっていることは既に述べたとおりである．そこでポイントとなるのが，風洞や実走時の流れを定性的，定量的に再現しているかということである．本節では，一例としてタイヤ後流に関して風洞とCFDでコリレーションをとった際の手法を説明する．

風洞ではタイヤ単体にてPIV測定装置を用い回転タイヤ周りの流れを解明した．Fig. 4にPIV測定によるタイヤ中心断面におけるベクトル線図を示す．タイヤ上部における剥離開始位置とウェイクサイズに着目する．(a)はPIV測定結果，(b)，(c)は，CFDによる計算結果である．表面メッシュは1 mm程度であり，乱流モデルはrealizable k-εを用いた．(b)は，y^+ - 1，(c)はy^+ - 10である．y^+とは格子と流速などから計算される無次元数で流れの様子を表す．剥離を計算するには粘性低層(y^+-1)に第一格子を置くのがよいとされている．y^+ - 1の第一格子高さは10 μmであった．

結果を見ると(b)は良好な剥離位置，ウェイクサイズを示すが，(c)はウェイク過大であることが確認できる．計算設定との兼ね合いであるが，タイヤ近傍の速度を過大に見積もった結果である．

タイヤと同様に各部位の計算手法を検証した結果，フルビークル計算では，以下の手法を用いることとした．

プリズムテトラメッシュを基本とし，プリズムは翼型部位に対し作成した．表面メッシュは翼型部位を1 mmとし，その他部位は2 - 4 mmのメッシュとした．Fig. 5にFW周りのメッシュを示す．実際の境界層メッシュ第一高さは10 μmである．

また車体周囲にコクーンと呼ばれるまゆ型形状を用い，表面メッシュサイズは10 mmとした．Fig. 6にコクーン形状図を示す．コクーンはCpT = 0.7の全圧等値面がほぼ収まる領域とした．

空間メッシュは，隣合うメッシュの成長率(propagation)によりメッシュ数は異なるが，成長率1.7で総メッシュ数5000万，成長率1.1で3億メッシュ程度である．Fig. 7に成長率の違いによる空間メッシュ密度の違いを示す．成長率が低いと物体から離れても空間メッシュ密度を高く保てることがわかる．

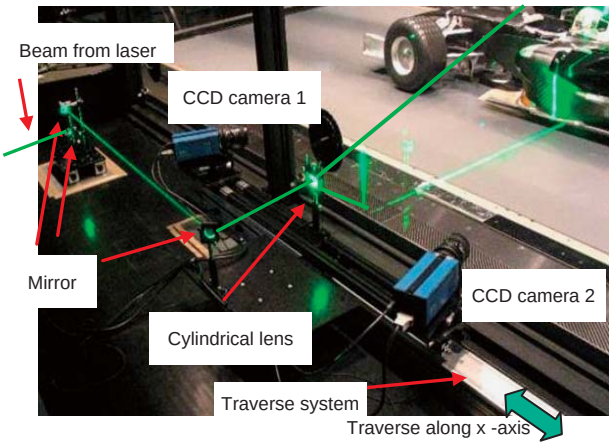
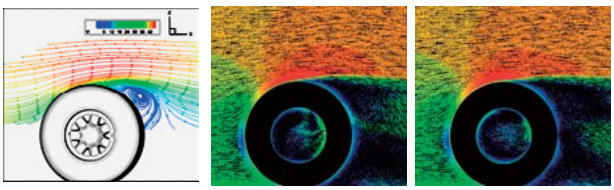


Fig. 3　PIV setting



(a) PIV　(b) CFDy^+ - 1　(c) CFDy^+ - 10

Fig. 4　Velocity vector at tire center section

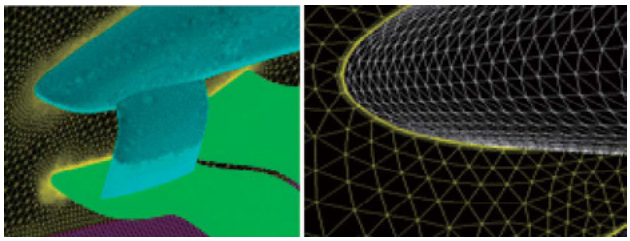
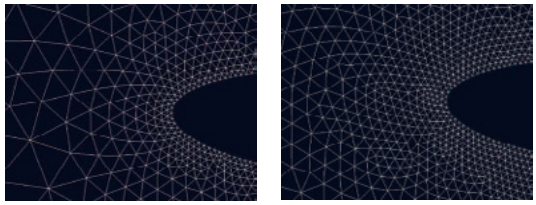


Fig. 5　Surface mesh of FW and symmetry plane

Fig. 6　Cocoon (iso-surface of CpT =0.7)



(a) Propagation 1.7　(b) Propagation 1.1

Fig. 7　Mesh propagation

Fig. 8 に車体下部の Cp 分布を示す．(a)コクーン無しに対し(b)コクーン有りでは車体周辺のメッシュを高密度に保つことができるので数値拡散の影響を小さくでき，結果として負圧が強くでている．格子密度を高くとり有効波数内で計算することが有効であることがわかる．

プリポスト機には，128 GB メモリ搭載の linux 機を用いた．計算サーバは，CPU に Xeon(R)CPU 3.0 GHz，1024 コアを装備しインターコネクトにinfiniband を装備している．成長率 1.1 の３億メッシュでは，256 並列計算で 24 時間を要する．

３．風洞最適化指標について

3.1. レギュレーション

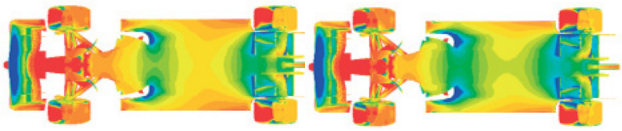
F1空力開発の大部分は，FIA の規定するレギュレーションにより許された範囲における形状の最適化である．レギュレーションは，レギュレーションボックス(Fig. 9)といわれる空力デバイス存在範囲の規定の他，フロア面の３次元形状を規制したフラットボトム規定，ウィング等の付加による安易な地面効果利用を禁止するシャドー規定，RWの翼枚数の規定など多岐にわたる．

また，年々進化を続ける空力による車両の高速化を抑制するため，数年に一度の割合でレギュレーションの見直しがおこなわれる．

3.2. ライドハイトマップ

3.2.1. ライドハイトマップとは

50%モデルは，風洞内において高度な制御ロジックにより，実走状態での車高(ライドハイト，以下RH)を模擬した状態で計測がおこなわれ，空力性能は複数の RH での算術平均として評価される．この複数の車体姿勢群は，RHマップと呼ばれ，車両をどのような状態で最適にするかを決定する重要な役割を持つ．その一例を Fig. 10 に示す．



(a) Propagation 1.7　　(b) Propagation 1.1

Fig. 8　Cp contour of underbody, range from -2 to 0.

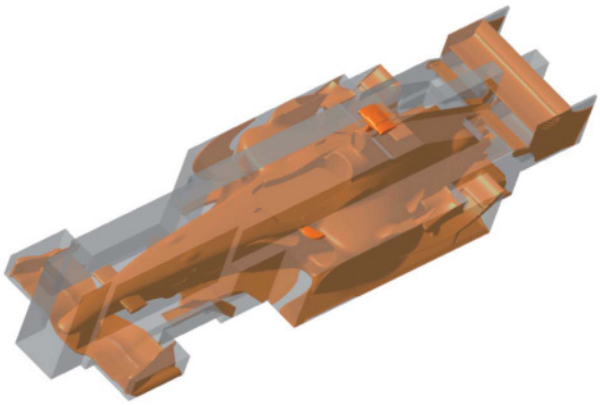


Fig. 9　Regulation box and F1 chassis

最も基本的な RH マップにおいては，実走データから得られた RH 群を包括するように代表的な RH が抽出される．１マップあたりのRHの点数は，その用途によって変わり，開発に用いられる場合は比較的少なく，車両運動解析に利用されるもの(マッピングデータと呼ばれる)はより多くの RH を網羅するように選ばれる．

これら RH マップを用い，各サーキットに合わせた車両ドラッグをターゲットに最適化がおこなわれる．

3.2.2. ヨー(クロスウィンド)，ステア，ロールの付加

近年では，風洞設備およびその制御技術の向上により，RH制御に加え，ヨー，ステア，ロールを付加することができるようになった．これにより，さらに実走状態に近い車体姿勢での空力開発が可能となった．特に，ヨー(あるいはクロスウィンド)とステアは，近年の F1 の空力開発に欠くことのできない重要な要素となっており，ひとつの RH マップの中でヨー，ステア，ロールを織り交ぜた複雑な車体姿勢での空力開発がおこなわれている．

3.2.3. Trajectory map と Curved flow

車両にかかる空気力は速度の２乗に比例するため，空力が車両性能に支配的な役割を果たすのは，250 kmph付近の高速コーナのみと考えられてきた．しかし，近年では中低速コーナにおいてもその影響が小さくないことがわかってきた．

そこで，上記の姿勢変化制御の進化とともに，減速から旋回，加速へとつながる一連の車体姿勢を，RHマップ上で離散的に再現する手法(Trajectory map)が開発されてきた．

一方，実際のコーナリング中は，車両はある角速度をもって回転しているため，気流は前後で異なる流入角をもつことになる．F1では，この角速度が一般車両にくらべ大きいため，この影響を無視できない．特に，車速に対する角速度の大きい中低速では前後流入角の違いが大きく，車体基準で見ると，あたかも曲がった気流の中にいるようになる．こ

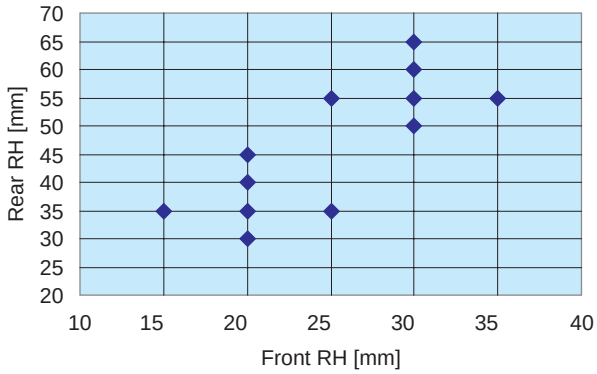


Fig. 10　Ride height map

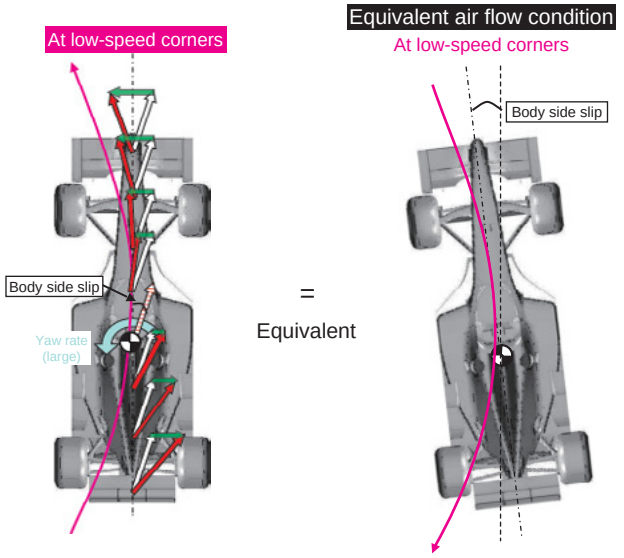


Fig. 11　Curved flow

れを Curved flow と呼ぶ(Fig. 11).

風洞試験では，当然 Curved flow を模擬することは不可能なので，CFD でその影響を調べ，ある種のヨー補正を Trajectory map に加えるということで対応した.

3.2.4. 重み付けとペナルティ

Trajectory map は，ある特定のコーナを模擬するという点で優れていたが，空力による車体の総合的な運動性能を評価するという点では柔軟性に欠けていた．さらに，運動性能の観点から，姿勢変化に対して空力中心(以下 CoP)の変動を最小化することの重要性が再認識された.

そこで，考えられたのが RH の重み付けと CoP 変動に応じたペナルティである．RHの重み付けとは，いわば低中高速コーナの重要度の比率を考慮に入れ，ラップタイム寄与度の高いコーナに相当する RH を偏重する加重平均である．一方，ペナルティとは，姿勢変化によるCoPの変動を，有効ダウンフォースの減少と捉えることで，姿勢変化耐性を数値化する評価手法の一つである.

現在でも，空力性能とそれに起因する運動性能の評価を，風洞テスト段階でおこなう試みがなされている.

4．新しい開発指標作りへの取り組み

本章では新たに確立した開発指標として，タイヤ変形が空力荷重へ及ぼす影響についての解析と，減速時の RW に掛かる空力荷重の過渡特性解析について紹介する.

4.1. タイヤ変形が及ぼす空力特性への影響

旋回や加減速時の横力や前後力によって，タイヤは常に変形している(Fig. 12)．しかし，実車風洞試験では，タイヤに加えられる荷重は車両自重とダウンフォースのみである．モデル風洞試験においても，鉛直荷重とベルトからの多少の横力しか加えることができない．つまり風洞では，旋回や加減速時に掛かる横力や前後力によるタイヤ変形を，正確に模擬できない．そこで，サーキット走行中のタイヤ形状が車体空力性能に及ぼす影響を明らかにし，風洞での再現方法等，空力開発の新しい指標を構築することが必要である．それにより，タイヤ変形に対してロバスト性のある空力車体の開発が可能になる.

具体的な手法としては，まず走行中にタイヤに作用する力を台上で再現し，それによる変形タイヤ形状を 3 次元測定器で測定する．この形状を用いた CFD により，流れの解析をおこなうことで，変形タイヤの車体空力性能への寄与度を明確化する．次に，風洞試験において，その流れを再現する手法を構築する.

本章では，空力的寄与度の大きかった，横力によるタイヤ変形の影響を中心に解説する.

4.1.1. サーキット走行データ

走行中タイヤに加わる力は，プッシュロッド荷重などから算出される．例として，走行データより得られたサーキット一周分の左フロントタイヤに掛かる横力と，それによるタイヤ軸の上下位置を Fig. 13，14 に示す．外輪で最大 10000 N 近い横力が掛かり，タイヤ軸の上下変位，すなわちタイヤの

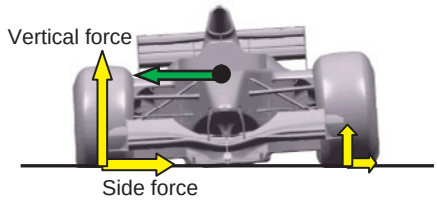


Fig. 12　Forces applied at cornering

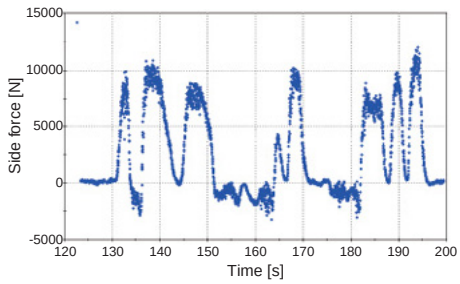


Fig. 13　Front tire side force on track

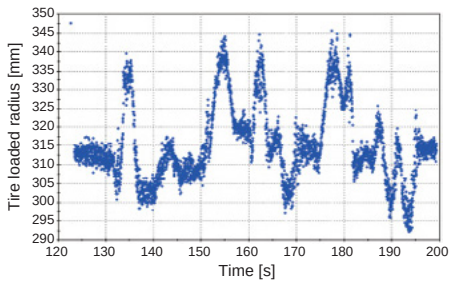


Fig. 14　Front tire loaded radius on track

上下潰れ量は，この横力に垂直荷重も加わるため，最大25 mm程度とかなり大きい．この他，減速時には後ろ方向に約 5000 N 程度の荷重が掛かる．

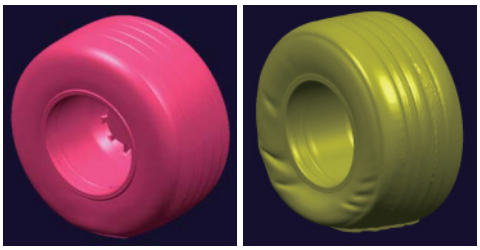
4.1.2. 変形タイヤ形状測定

走行時にタイヤに作用する荷重を台上で再現し(Fig. 15)，その状態で形状を３次元測定器(FARO，Vectron，T-Scanなど)を用いて測定した．ただし静的荷重であるため，回転による遠心力による変形は再現されていない．Fig. 16はその一例で，7000 Nの横力を加えたときの形状である．タイヤ側面が接地点近傍で，横方向に約 20 mm たわんでいる．

4.1.3. 横力によるフロントタイヤ変形時の流れ解析

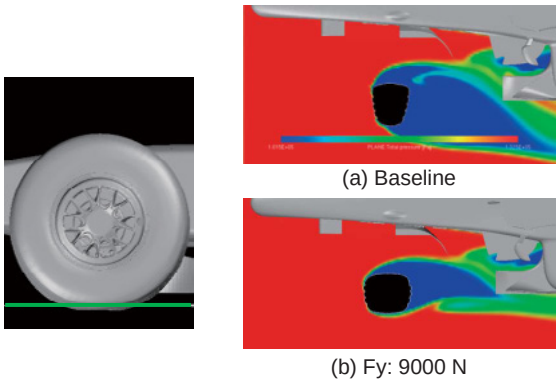
測定されたフロントタイヤ形状を CFD により解析した．9000 Nの横力を加えたタイヤでは，横力なしのタイヤに対し，約５％の車体ダウンフォースを失うことがわかった．Fig. 17に，横力なしと，横力ありの場合の地面付近の全圧分布を示す．横力ありの場合，タイヤ外側側面の剥離点位置が，大きく後退していることがわかる．

Fig. 15　Tire test rig



(a) Baseline　　(b) Fy: 7000 N

Fig. 16　Snapshots of scanned tire



(a) Baseline

(b) Fy: 9000 N

Fig. 17　Total pressure distribution

この剥離点の後退により，XY面でのタイヤ周りの循環が変化し，車体外側に向かっていたタイヤ後流が床下に流れ込んでしまう(Fig. 18)．それにより床下動圧が減少し，ダウンフォースが低下することが，横力なしから横力ありのタイヤに変えたときの床下静圧変化より見て取れる(Fig. 19)．

次に，この剥離点移動の要因分析をおこなった．まず，横力ありのタイヤの外側側面に，横力なしのタイヤ表面形状を張り付けて計算をおこなった(Fig. 20)．その結果，剥離位置は前方に移動し，５％のダウンフォースの低下分のうち４％が回復した．

次に，タイヤ接地面の形状に着目し，外側前縁のコーナに角を付けて計算した(Fig. 21)．こちらも剥離点の前方移

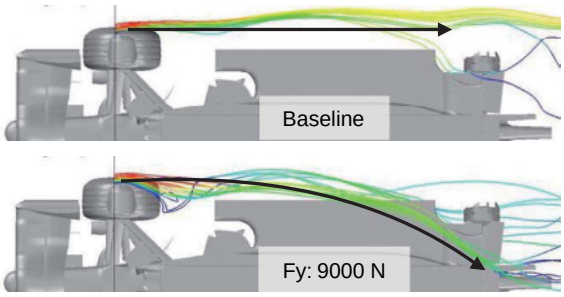


Fig. 18　Tire wake direction

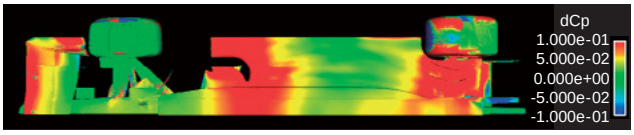


Fig. 19　Deformed tire effect (delta Cp)

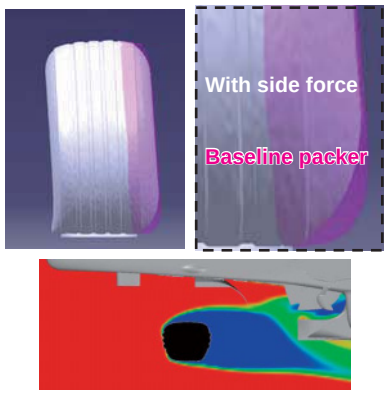


Fig. 20　Result of baseline packer

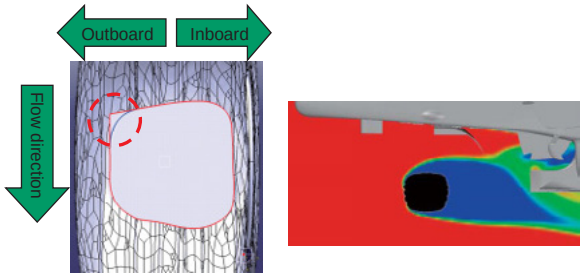


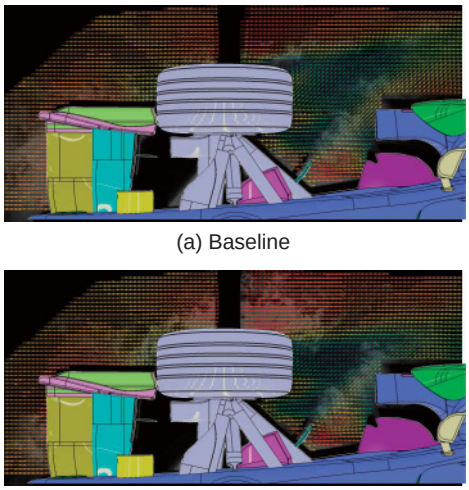
Fig. 21　Result of edged contact patch corner

動により，4.5%のダウンフォースが回復し，ほぼ横力なしタイヤの計算結果に近づいた．

次に，50%モデル風洞を用いて本現象の確認をおこなった．ただし，風洞設備上，タイヤに横力を加えることができないため，まずは鉛直方向のつぶれ量だけを再現した．

Fig. 22 に2次元 PIV による測定結果を示す．CFD 結果と同様，タイヤ変形により，タイヤ外側側面の剥離点位置が後退していることがわかる．なお，この際のダウンフォース変化も−3%となり，空気力の定性的な傾向も一致している．

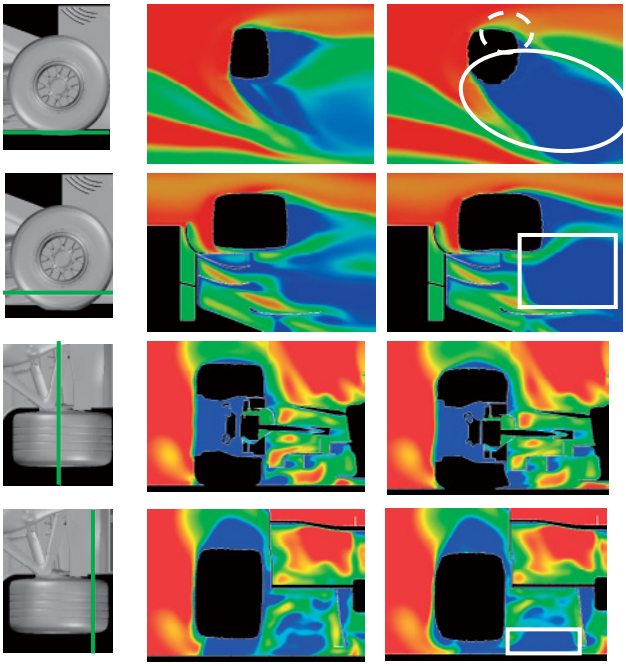
以上のことから，CFDとモデル風洞試験では，厳密なタイヤ変形形状は異なるものの，タイヤ変形によってタイヤ外側側面の剥離点位置が後退し，その結果車体ダウンフォースが減少することがわかった．



(a) Baseline

(b) 10mm squashed

Fig. 22　PIV velocity vector



(a) Baseline　(b) Fy: 6500 N

Fig. 23　Tire wake comparison (total pressure)

4.1.4. 横力によるリヤタイヤ変形時の流れ解析

フロントタイヤ同様に，リヤタイヤについても CFD による解析をおこなった．6500 Nの横力を加えたタイヤでは，横力なしのタイヤに対し，約4%の車体ダウンフォースを失うことがわかった．Fig. 23に，横力なしと，横力ありの場合のディフューザ付近の全圧分布を示す．横力ありの場合，タイヤ内側の剥離領域が大きくなる(図中，実線丸)と同時に，フロントタイヤ同様タイヤ外側側面の剥離点位置が後退し(図中，点線丸)，タイヤ後流が車体中央に流れ込んでいる(図中，実線四角)．その後流がブロッケージとなりディフューザ流量が減少し，車体ダウンフォースが低下することが，横力なしから横力ありのタイヤに変えたときの床下静圧変化より見て取れる(Fig. 24)．

4.1.5. 実車風洞による影響確認

実車風洞を用い，CFDとモデル風洞により得られた結果の検証をおこなった．設備上，実車風洞では車両自重とダウンフォース以外の荷重をタイヤに加えることができない．そのため，車速によるダウンフォース変化を利用することで，鉛直方向のタイヤつぶれ量を変化させ，その影響を解析した．このとき，車高はサスペンションの調整により一定に保った．

Fig. 25に，風速に対する前輪のタイヤつぶれ量と無次元ダウンフォースの変化率を示す．ダウンフォースの変化率は風速 30 m/s でのダウンフォースを基準とした値である．風速の増加に伴いダウンフォースが増加しタイヤがつぶれることで，無次元ダウンフォースが低下している．これは，4.1.3. 節に示した CFD およびモデル風洞結果の方向性と一致している．また，この無次元ダウンフォース変化がタイヤ外側の剥離点移動を伴うことも，PIV により確認された．

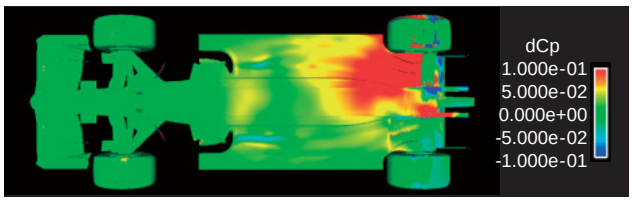


Fig. 24　Deformed tire effect (delta Cp)

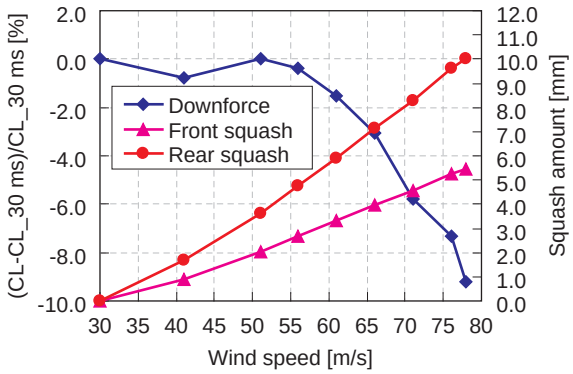


Fig. 25　Squash and downforce change

Fig. 26 に，車速が 40 m/s と 70 m/s のときのダウンフォースをフロントタイヤに静的に付加したときのタイヤ形状を示す．荷重の増加によりタイヤ接地面外側の頂点が緩やかになり，タイヤ下部の変形量が大きくなっていることが確認できる．

ただ，本実験の無次元ダウンフォースの変化はタイヤ変形の影響の他，各部位のたわみやサスペンションの位置変化の影響も含まれており，それらが多少の影響を与えていることも考慮する必要がある．

4.1.6. タイヤメーカ違いによる影響

タイヤメーカによっても，タイヤ側面のたわみ形状や接地面形状は違い，その影響も違ってくる．例えば，A社とB社の同じつぶれ量のタイヤを CFD により比較すると，B社のタイヤでは約５％車体ダウンフォースが低い．これは，B社のフロントタイヤ外側剥離点が後退していることと，リヤタイヤ内側の後流が大きくなっていることによるものであることが，Fig. 27 よりわかる．この結果は実車風洞での無次元ダウンフォースの大小とも傾向があっている(Fig. 28)．しかし，特に接地形状はキャンバ等によっても変わるため，結論はそれらの影響を十分考慮してから出す必要がある．

4.1.7. 風洞タイヤたわみ再現手法

サーキットで安定した空力性能を発揮するためには，タイヤ変形形状に対するロバスト性を向上させる必要がある．

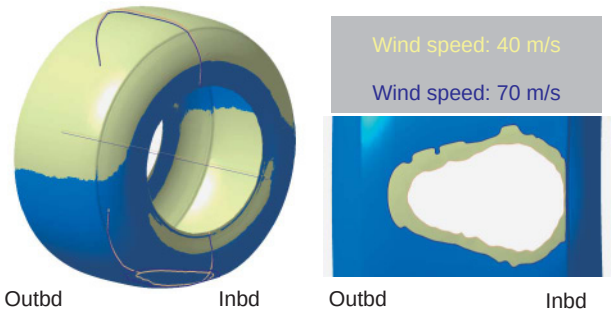


Fig. 26　Snapshot of scanned tire

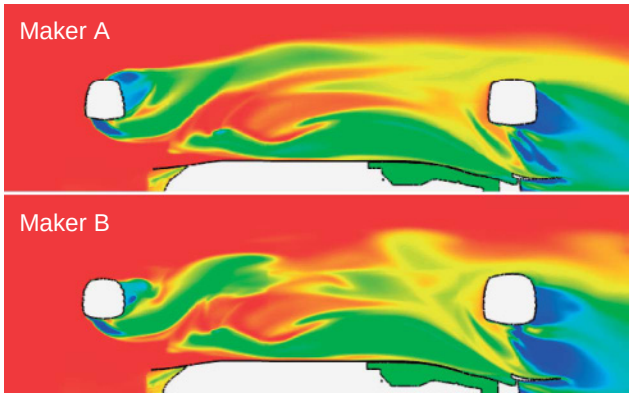


Fig. 27　Total pressure under floor

そのため，風洞開発では，最悪のケースを想定する必要がある．その方法として，プッシュロッドによりタイヤに垂直荷重を加えたり，Fig. 29のようにタイヤ内側からローラで側壁を押し出したりといった手法が有効であると考える．

4.2. 減速時の空力過渡特性

サーキット走行時の測定により，減速時の無次元ダウンフォースが低下している可能性が指摘されていた．特にRWについては，減速による境界層の発達や後流の追いつきによる無次元ダウンフォースの低下などの可能性があった．そこで実機の RW を用い，水槽によるスローモーション試験をおこなうことで，減速中の剥離の有無や荷重変化について解析をおこなった．

4.2.1. 試験条件

まず，荷重による供試体の変形など，空力以外の影響をサーキット走行時と同じにするため，実走時と空力荷重を合わせることとした．空気中と水中で力を合わせる，つまり動圧を一定

$$q = \frac{1}{2}\rho U^2 = const$$

とすると(ρ：密度，U：速度)，大気温度 25℃，水温 15℃のときの水中での速度は，

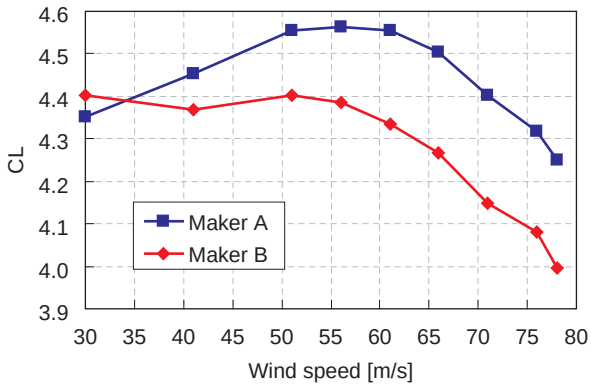


Fig. 28　Normalized downforce comparison

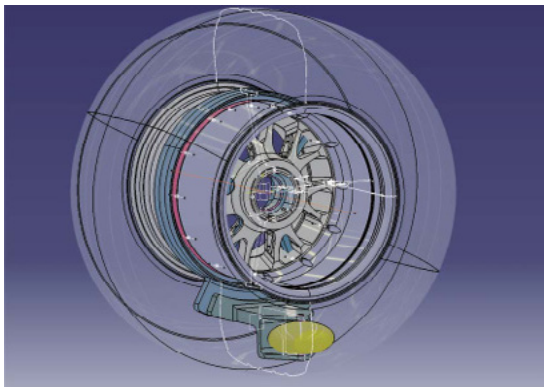


Fig. 29　Method of deforming rubber tire in wind tunnel

$$U_{water} = \sqrt{\frac{\rho_{air}}{\rho_{water}}} U_{air} = 0.034 U_{air}$$

となり，水中では空気中の速度の 30 分の 1 となる．その時のレイノルズ数は，

$$\mathrm{Re}_{water} = \frac{U_{water}\nu_{air}}{U_{air}\nu_{water}} \mathrm{Re}_{air} = 0.47\ \mathrm{Re}_{air}$$

となり（ν：動粘性係数），水中では空気中の半分程度になるが，車速の変化やモデル風洞試験を考慮すると許容値であるといえる．

また，Froude 数を一定

$$Fr = \frac{U^2}{gL} = const$$

とすると（g：加速度，L：代表長さ），水中での加速度は，

$$g_{water} = \frac{U_{water}^2}{U_{air}^2} g_{air} = 0.0012 g_{air}$$

となり，水中では空気中の 1000 分の 1 になることがわかる．

これにより，水中ではスローモーション試験が可能となり，実走では誤差により計測が難しい減速時の過渡空気力測定が高精度でおこなえる．本実験では，0.005 - 0.05 G の減速試験と 1.02 - 2.94 m/s（大気中 106 - 307 km/h 相当）の定速試験をおこなった．

4.2.2. 水槽設備と試験治具

水槽は，長さ 200 m，幅 10 m，深さ 5 m のものを使用した（Fig. 30）．えい航装置に 6 分力ロードセルと取り付け治具を付け，水深約 1 m のところに RW を上下逆さに取り付けた．また，水面の造波を抑えるため，水面付近にアクリル製の波消し板を取り付けた（Fig. 31）．

4.2.3. 実験結果

減速中の過渡空力特性の有無を調べるために，2.94 m/s（大気中 307 km/h 相当）より 0.005 G（大気中 4.2 G 相当）で減速させたときの RW のダウンフォースと，定速走行時の値との比較をおこなった（Fig. 32）．さらに，0.05 G まで減速 G を変化させて同様の試験をおこなったが，そのときも特に減速中の過渡特性は見られなかったことから，減速中においても単体では RW がねらいどおり機能していることが証明できた．

Fig. 30　Towing tank

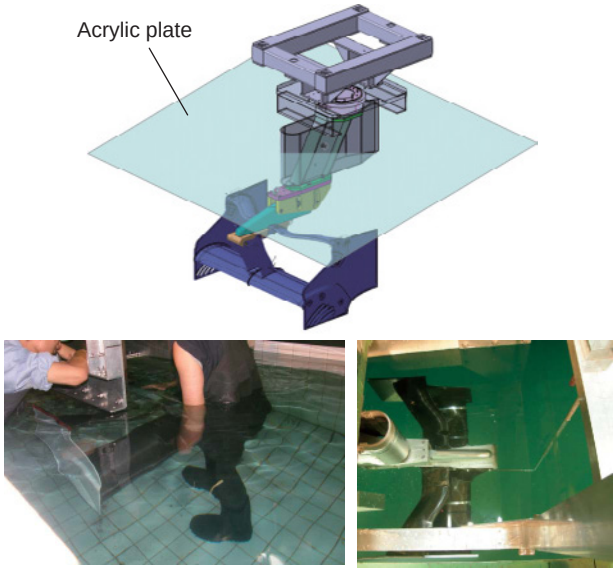


Fig. 31　RW assembly

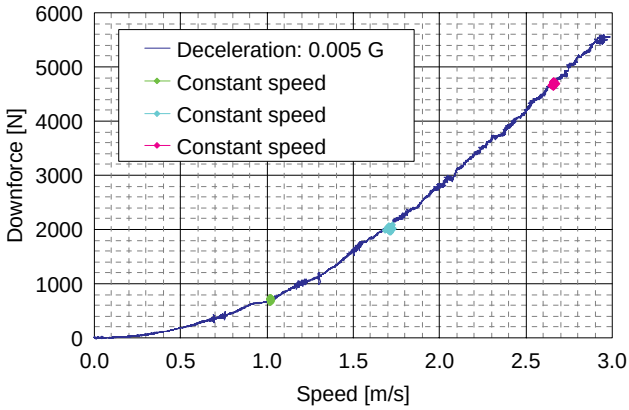


Fig. 32　Hydrodynamic force comparison between deceleration and constant speed modes

これにより，さらなる高負荷翼や空力弾性などを扱う場合においても，水槽試験は実走での性能保証をおこなう有効な手段であるといえる．また，減速中のリヤタイヤ後流の追いつきによる，RW無次元ダウンフォース低下の可能性など，新たな流体現象を再現する場合にも有効な手段である．

5．あとがき

本稿では 2008 年までの空力開発指標と，タイヤ変形の空力荷重への影響解析や減速時の空力過渡特性解析など新たに確立した空力開発指標を紹介した．これらの取り組みにより，実走時の車両周りの空気流れについて，理解を深めることができた．

謝　辞

長年に渡って共に空力開発をおこなってきた，旧 BAR, HRF1 の皆様，水槽実験で御協力と御助言を頂いた株式会社 IHI の方々に深く感謝の意を表します．

■著　者■

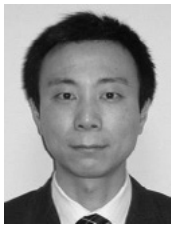
小川　厚

矢野修二郎

真塩　享

滝口　貴

中村信介



新谷　満